

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06101

研究課題名(和文)チタン微細金型製造における加工条件最適化と高速加工に向けた多価イオン応用

研究課題名(英文)Development of multicharged ion beam assisted processing technology for high-speed etching of titanium micro mold

研究代表者

浅地 豊久 (Asaji, Toyohisa)

富山高等専門学校・機械システム工学科・教授

研究者番号：70574565

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：チタン板プラズマ加工の実験では、加工ステージに印加する高周波の周波数を1MHzに下げることで、 $1\mu\text{m}/\text{min}$ を超える加工レートを得た。その後、多価イオンビーム支援プラズマ加工実験のためにECRイオン源、ウィーンフィルタを用いた質量分離部および加工部で構成される装置を開発した。アルゴンでは2価、キセノンでは3価の多価イオンを分離することができた。多価イオンビーム支援によって加工速度は約20%向上し、その有意性を確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで多価イオンビームを用いた応用は国立研究所等の研究機関に限られていた。本研究で開発した小型の多価イオンビーム装置は卓上サイズで安価なため、一般の材料研究者にも使いやすい。今後の継続開発によって実用化販売も可能となる。また、イオンビーム支援加工についてはイオンビームの効果を確認することができた。今後、反応ガスの多価イオンビームを用いるなどの追加実験によって、より高速加工が可能と考えている。

研究成果の概要(英文)：The plasma etching rate of titanium plate was improved to $1\mu\text{m}/\text{min}$ by applying a radio-frequency of 1 MHz instead of 13.56 MHz to the processing stage. We have developed a new multicharged ion beam assisted processing system consisting of an ECR ion source, a Wien filter, and a processing stage. A commercially available 1.2-GHz transceiver was adopted as a microwave source to generate the ECR plasma. The Wien filter with orthogonal electric and magnetic fields was employed as a beam separator. Ar ion beams with a current of approximately $62\mu\text{A}$ were obtained at an extraction voltage of 4 kV. In addition, we demonstrated that Ar and Xe ions can be separated by the Wien filter. Multicharged ion beams such as Ar^{2+} and Xe^{3+} have been produced. The multicharged ion beams have improved the processing speed of silicon wafers by about 20%.

研究分野：イオンビーム応用

キーワード：イオンビーム プラズマ 微細加工

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

半導体製造技術とともに発展してきたプラズマ微細加工技術は、3軸加速度センサーなどのMEMS製造に転用され、さらに、加工対象とする材料はシリコン等の半導体のみに留まらず、ポリマーや圧電材料など多種多様な材料に広がっている。

申請者らは、独自に開発したプラズマ微細加工装置を用いて、ニオブ酸リチウムなどの難加工材料からポリマーのような熱に弱い材料まで加工技術を確認し、多数の特許取得や論文投稿を行ってきた。近年は、高い耐久性を持ち、新たな金型材料として期待されているチタンの微細加工に成功し、樹脂成形用金型として実用化にあと一步のところまで達している。しかしながら、チタンを始めとして様々な材料にプラズマ加工を適用してもシリコンのように数十 $\mu\text{m}/\text{min}$ の高速加工は実現できず、おおむね $1\mu\text{m}/\text{min}$ 程度が上限となっており、シリコン以外の材料でプラズマ加工の実用化を加速するためには何らかのブレークスルーが必要となっている。

申請者が参加しているもう一つの研究グループでは、多価イオンの生成・応用の研究開発を進めている。多価イオンの応用研究において、材料表面との相互作用はまだ十分解明されていないものの、その高い内部エネルギーにより、グラファイトが局所的にダイヤモンドに変質するなどの特異性が示され始めている。これまで多価イオンの加工応用は、アルゴンなどを用いたスパッタリングすなわち物理加工が主であり、エッチングガスであるハロゲンプラズマ雰囲気中での多価イオンビーム照射やハロゲン多価イオンを用いたビーム加工、また減速して運動エネルギーを減らし、多価イオンの高い内部エネルギーと材料表面の相互作用を利用した加工などまだ十分な研究が行われていない分野と言える。

これらの背景より、本研究では微細金型として有望なチタンのプラズマ加工条件の最適化を図るとともに、多価イオン照射が与える効果を検証し、シリコンのような高速加工を実現するためのブレークスルーにつなげることを目指す。

2. 研究の目的

これらの背景をもとに、本研究では微細金型の製造に使用するプラズマエッチング加工において、イオンビーム支援機能を付加することにより、加工レートの向上を図ることを目的とした。

3. 研究の方法

多価イオンビーム支援プラズマ加工装置の開発からイオンビームの生成、さらには照射実験へと展開するために、本研究計画では以下の研究項目を実施した。

- (1) チタン板のプラズマ加工レートの実験
- (2) 多価イオンビーム支援プラズマ加工装置の開発
 - ① ECRイオン源を用いた小型イオンビーム装置の設計・製作
 - ② イオンビーム引出電極の最適化
 - ③ 質量分離器（ウィーンフィルタ）の分解能向上
 - ④ 多価イオンの生成
- (3) イオンビーム支援加工レートの検証

4. 研究成果

(1) チタン板のプラズマ加工レートの実験

予備実験として実施したチタン板のプラズマ加工レートの実験では、加工ステージに印加する高周波の周波数を13.56MHzから1MHzに下げることによって、以前の最高値であった $0.6\mu\text{m}/\text{min}$ を大きく上回り、 $1\mu\text{m}/\text{min}$ を超える加工レートを得た。この結果より、イオンビームによる物理的なスパッタリング効果を向上させると加工レートが上がることを示され、多価イオンビーム支援による高速加工が期待される。

(2) 多価イオンビーム支援プラズマ加工装置の開発

① ECRイオン源を用いた小型イオンビーム装置の設計・製作

本研究に用いた多価イオンビーム支援プラズマ加工装置を図1および2に示す。本装置は、ECRプラズマを生成してイオンを引き出すイオン源部、引き出したイオンビームを集束して質量電荷比ごとに分離するビームライン部、プロセスステージが設置されている加工部で構成されている。

イオン源にプラズマ生成用のアルゴ

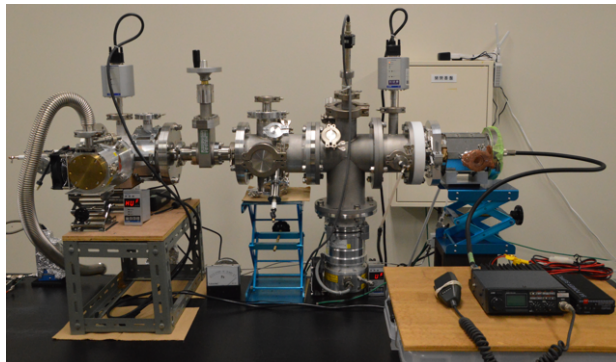


図1. 多価イオンビーム支援プラズマ加工装置外観

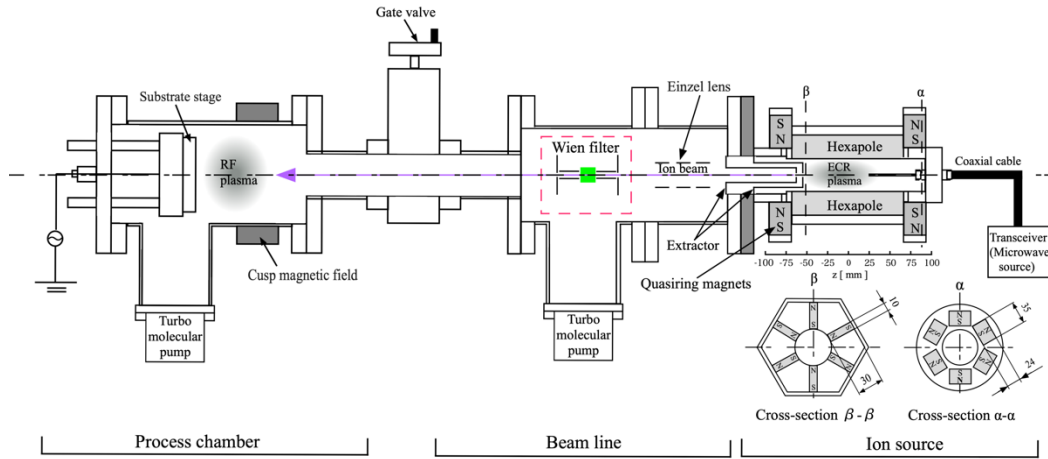


図 2. 多価イオンビーム支援プラズマ加工装置の構成

ンガス等を導入して、商用無線機から 1.26 GHz のマイクロ波を出力することで ECR プラズマを生成する。ビームラインに設置されている電磁場直交型質量分離器であるウィーンフィルタは、一般的な扇形磁場型質量分離器に比べて小型化が期待できる。また、イオンビームの進行方向を曲げずに取り出せる利点もある。加工部では、基板ステージに 13.56 MHz の高周波電力を印加することで磁場支援容量結合プラズマを生成できるとともに、基板加工等に利用するバイアス電圧を加えることができる。

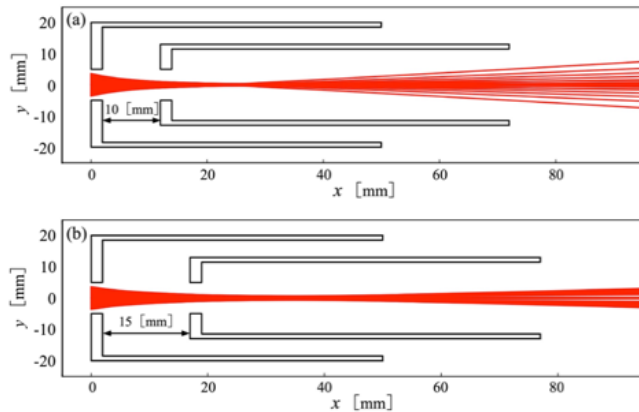


図 3. 電極間隔 (a) 10 mm および (b) 15 mm におけるイオンビームの軌道シミュレーション

② イオンビーム引出電極の最適化

イオンビーム引出電極の最適化を

図るために、電極の間隔を 10 mm または 15 mm に設定してファラデーカップに到達するイオンビーム電流を計測した。プラズマの生成には Ar ガスを使用し、圧力は 1.80×10^{-3} Pa で保持した。引出電極に 0~4.0 kV の電圧を印加してイオンを引き出した。アインツェルレンズには電圧を印加せずビームを集束させないで、ファラデーカップに到達するイオンビーム電流を比較した。その結果、引出電圧が 2 kV 程度では、電極間隔が 15 mm の場合より 10 mm の場合の方がイオンビーム電流は大きくなった。その後、引出電圧が上昇すると、電極間隔が 10 mm の場合より 15 mm の場合でイオンビーム電流が大きくなった。

実験結果を検証するために、引出電圧 3 kV、引出電極間隔が 10 および 15 mm の場合におけるイオンビームの軌道シミュレーションを行った (図 3)。シミュレーションから電極間隔を広げることによって、イオンビームの直進性が向上していることが分かる。本装置において、引出電圧が 2 kV 程度と低い場合は、電極間隔 10 mm の方がイオンビームの直進性が良く、引出電圧が 2 kV 以上の場合は、電極間隔 15 mm の方がイオンビームの直進性が良くなると考えられる。今後さらに、引出電極の形状や間隔を変化させることで、引出系の最適化を図る。

③ ウィーンフィルタの分解能向上

ウィーンフィルタの質量分離分解能を調べるために、引出電極間隔およびウィーンフィルタ

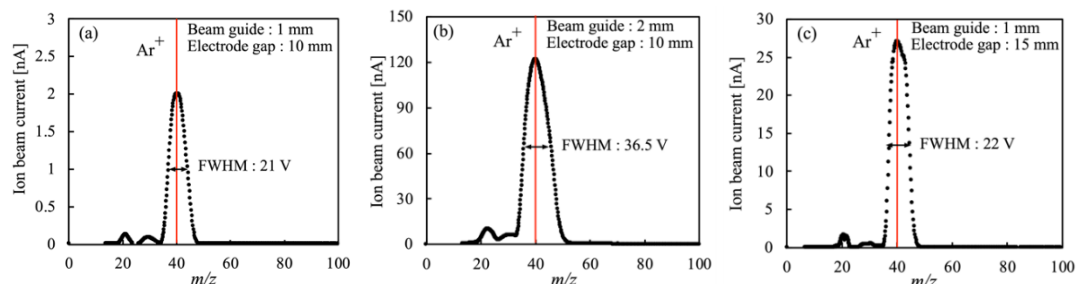


図 4. アルゴンイオンビームの質量分離スペクトル. (a) ビームガイド 1 mm, 電極間隔 10 mm, (b) ビームガイド 2 mm, 電極間隔 10 mm および (c) ビームガイド 1 mm, 電極間隔 15 mm.

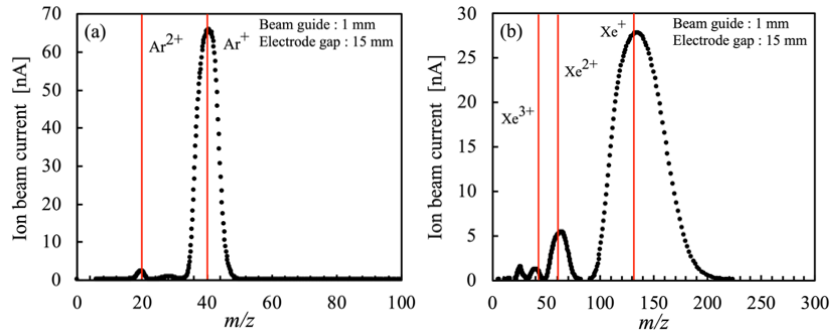


図 5. (a) Ar および(b) Xe イオンビームの質量分離スペクトル

前後に設置されたビームガイドの直径を変化させて質量分離実験を行った。引出電極間隔は 10 または 15 mm として、ビームガイド直径は 1 または 2 mm とした。プラズマ生成には Ar ガスを使用し、圧力は 1.64×10^{-3} Pa で保持した。イオン源には 3.0 kV の電圧を印加してイオンを引き出した。アインツェルレンズには約 2 kV の電圧を印加してビームを集束させ、ウィーンフィルタを通過してファラデーカップに到達するイオンビーム電流が最大となるようにした。

図 4 (a), (b) に引出電極間隔を 10 mm とし、ビームガイド径が 1 mm および 2 mm の場合の Ar イオンビーム質量分離スペクトルを示す。(c) は引出電極間隔が 15 mm でビームガイド径が 1 mm の場合である。(a) と (b) からビームガイド径が 2 倍になることで、イオンビーム電流量が約 60 倍に増加していることが分かる。また、半値幅も 21 V から 36.5 V に増加している。(a) と

(c) の比較から、引出電極間隔が 10 mm から 15 mm に広がることでイオンビーム電流量が 10 倍以上に増加していることが分かる。半値幅はあまり変化しなかった。ビームガイド径が 2 倍になることでイオンビームが通過可能な表面積は 4 倍に増加する。そのため、イオンがビームガイド断面に対して角度をもって入射してもウィーンフィルタを通過できる割合が増加したため、イオンビーム電流量は 4 倍以上に増大したと考えられる。また、引出電圧が 3 kV の場合に引出電極間隔を広げることでイオンビームの直進性が向上することはイオンビームの軌道シミュレーションより明らかになっている。本実験においても、電極間隔を広げることでビームの直進性が向上し、ウィーンフィルタを通過後ファラデーカップに到達するイオンが増加したと考えられる。また、全ての場合で横軸約 20 の値に Ar^{2+} を確認した。 Ar^+ イオンビームの質量分離スペクトルの半値幅はビーム電流の増大とともに増加し、質量分離分解能の向上は見られなかった。

④ 多価イオンの生成

ウィーンフィルタを用いて、Ar および Xe イオンビームの質量分離を行い、多価イオン生成量を確認した。多価イオンを生成するために装置内の圧力をプラズマ生成下限付近まで下げて実験を行った。Ar および Xe の場合それぞれ 6.7×10^{-4} Pa および 1.5×10^{-4} Pa であった。引出電極間隔は 15 mm でビームガイド径は 1 mm である。

図 5 に (a) Ar および (b) Xe イオンビームの質量分離スペクトルを示す。Ar は原子量が約 40 であるため、横軸が約 40 の値で Ar^+ を、横軸が約 20 の値で Ar^{2+} を確認することができた。Xe は原子量が約 131 であるため、横軸が約 131 の値で Xe^+ を、横軸が約 62 の値で Xe^{2+} を確認することができた。また、横軸が約 43 の値では Xe^{3+} が見られた。

Xe は Ar よりも電離エネルギーが小さいため、多価イオンを生成しやすい。そのため、Ar に比べて Xe の多価イオンビーム電流量が大きくなったと考えられる。

(3) イオンビーム支援加工レートの検証

本研究室のイオン源を用いて、シリコンウェハに対するイオンビーム照射実験を行なったところ、イオン電流量がまだ少ないため加工量が小さく段差測定が困難であった。そこで、共同研究を行なっている大島商船高専のイオンビーム装置に、本装置の加工部を設置してイオンビーム照射実験を行なった。50 W の高周波電力を印加して容量結合プラズマを生成した場合、約 0.2 μm の段差を測定できた。また、イオンビームによる加工支援を加えた場合には約 0.25 μm の段差となり、その有意性を確認できた。今後さらにサンプル数を増加させて実験を行う。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Asaji Toyohisa, Uyama Hiroya, Umetsugu Takuro, Nakamura Tsubasa, Hitobo Takeshi, Kato Yushi	4. 巻 90
2. 論文標題 Development of 1.2-GHz ECR ion source and Wien filter for inexpensive ion beam processing system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 123508 ~ 123508
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5127348	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 鶴山博也(富山高専), 山崎達瑛(富山高専), 浅地豊久(富山高専), 人母岳(立山マシン(株)), 中村翼(大島商船), 加藤裕史(大阪大院)
2. 発表標題 デスクトップ型電子サイクロトロン共鳴イオン源用ウィーンフィルタの開発
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎 達瑛, 岡崎 陽大, 鶴山 博也, 浅地 豊久, 人母 岳
2. 発表標題 デスクトップ型電子サイクロトロン共鳴イオン源の開発
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山崎 達瑛, 鶴山 博也, 岡崎 陽大, 浅地 豊久, 人母 岳, 加藤 裕史
2. 発表標題 デスクトップ型ECRイオン源におけるイオン生成の効率化
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第47回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鶴山 博也, 岡崎 陽大, 山崎 達瑛, 浅地 豊久, 人母 岳, 加藤 裕史
2. 発表標題 デスクトップ型ECRイオン源のビーム輸送系の最適化
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第47回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鶴山 博也, 浅地 豊久, 中村 翼, 人母 岳, 加藤 裕史
2. 発表標題 デスクトップ型ECRイオン源用ウィーンフィルタの分解能向上
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyohisa Asaji, Hiroya Uyama, Takuro Umetsugu, Tsubasa Nakamura, Takeshi Hitobo and Yushi Kato
2. 発表標題 Development of 1.2 GHz ECR Ion Source and Wien Filter for Inexpensive Ion Beam Processing System
3. 学会等名 18th International Conference on Ion Sources (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----